

杭・ラフト底面摩擦・地下階の根入れ抵抗を考慮したパイルド・ラフト基礎の 水平荷重分担率に関する解析的検討

岸 俊 甫 土佐内優介
佐々木 仁^{*1}

概 要

パイルド・ラフト基礎は杭基礎と直接基礎を併用した基礎形式である。近年パイルド・ラフト基礎を適用した超高層建物が増加している。超高層建物には地下階がある場合が多く、地震時の水平抵抗要素として、ラフト底面の摩擦抵抗、杭の水平抵抗、建物根入れ部の抵抗が考えられる。本報告では、地震時の3つの水平抵抗要素の荷重分担率を把握することを目的として、根入れ深さをパラメータとした立体フレームモデルを作成し、増分解析を実施した。

解析結果より、根入れ深さに比例してラフト底面摩擦と杭が負担する水平荷重が減少していること、杭の負担荷重の減少に伴い杭頭応力が減少していることが確認できた。

Study on Horizontal Load Sharing Ratio of Piles / Raft Bottom Friction / Earth Pressure Acting on Embedded Footing in Piled Raft Foundation Based on Numerical Analysis

Abstract

A piled raft foundation is a foundation type that combines a pile foundation and a direct foundation (raft). The number of skyscrapers in which piled raft foundations are applied is increasing. Skyscrapers often have basements, and as for horizontal resistance factors during an earthquake, frictional resistance at the bottom of the raft, horizontal resistance of piles, and resistance at the base of the building can be considered. In this report, a three-dimensional frame model with the penetration depth as a parameter was created for the purpose of identifying the load sharing ratio of the horizontal resistance factors during an earthquake, and incremental analysis was performed.

As a result of the analysis, it was confirmed that the friction on the bottom surface of the raft and the shear force at the pile head decreased in proportion to the depth of embedding, and that the stress at the pile head decreased.

キーワード： パイルド・ラフト基礎、
立体フレーム、水平抵抗

*1 大和ハウス工業株式会社

§1. はじめに

パイルド・ラフト基礎は杭基礎と直接基礎(ラフト)を併用した基礎形式である。杭とラフトが複合的に建物を支持できることから、杭基礎と比較すると杭径や杭長を小さくすることが可能といったメリットがある。近年、超高層建物にパイルド・ラフト基礎を適用する事例が増えており、設計や施工に関しての実施報告^例ば^{1),2)}が発表されている。超高層建物には地下階がある場合が多く、地震時の水平抵抗要素には

- ・ラフト底面の摩擦抵抗
- ・杭の水平抵抗
- ・建物根入れ部の抵抗

があると考えられる。本検討では、パイルド・ラフト基礎を適用した超高層建物をモデル化し、各抵抗要素の荷重分担率を把握すること、特に根入れ深さの影響を把握することを目的として、立体フレーム解析の増分解析を実施した。なお、本報告は既報³⁾について内容を再構成したものである。

§2. 建物

2.1 想定建物と慣性力

図 1 に本検討に用いた建物の概要を示す。パイルド・ラフト基礎を採用した超高層 RC 造建物で、平面形状を 50m×50m、杭径 1.2m、杭長 20m の直杭とし、杭のコンクリート強度は Fc42 とした。杭本数は 6 本×6 本の計 36 本である。建物重量 ΣW を 2,000,000kN と設定した。稀に発生する地震による水平荷重を L1 荷重、極めて稀に発生する地震によるものを L2 荷重とし、地震時に基礎に作用する水平荷重については、L1 荷重時で 100,000kN、L2 荷重時で 250,000kN と設定した。このとき、上部構造の層せん断力係数は多質点系モデルによる予備応答解析から算定した。地下の水平震度は L2 で 0.40 とした。

2.2 想定地盤

図 1 に想定地盤の概要を併せて示す。根入れ抵抗要素となる表層から基礎底までの地盤は N 値 30 の砂質土とし、内部摩擦角を $\phi = \sqrt{12.5N} + 15$ の関係式により 39.5 度とした。有効上載圧の効果は考慮せず、内部摩擦角は根入れ部の全層で一定とした。基礎底から杭先端までの地盤は単位体積重量 $\gamma = 19\text{kN/m}^3$ 、 S 波速度 $V_s = 300\text{m/s}$ 、杭先端以深は $\gamma = 20\text{kN/m}^3$ 、 $V_s = 400\text{m/s}$ とした。

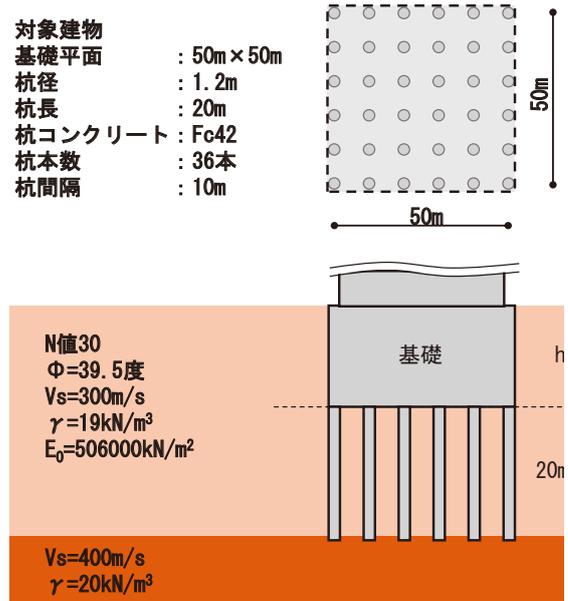


図 1 建物および地盤概要

§3. 解析概要

3.1 モデル化とパラメータ

図 2 に増分解析のモデル概要を示す。解析には汎用立体フレーム解析ソフト⁴⁾を用いた。杭は弾性梁要素でモデル化し、長さ方向に 0.5m 毎に分割した。ラフトは剛床を仮定し、杭頭とラフトは剛接合とした。杭の各節点に地盤ばねを設け、地震動による地盤変形とラフト底面摩擦による地盤変形を作用させた。ラフトには底面摩擦抵抗を模擬するためのバイリニアばねを設けた。さらに、建物根入れ部の抵抗を考慮するため、ラフトには土圧合力ばねも設けた。土圧合力ばねは、根入れ長さ h を 0m、5m、10m、20m と変化させ、それぞれのケースの水平荷重分担率を算定した。

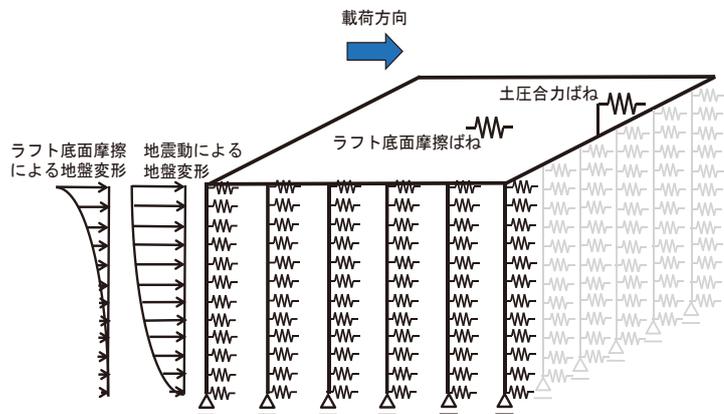


図 2 解析モデル概要

3.2 水平地盤ばね

地盤剛性は前述の S 波速度から算定し、地盤ばね k_{h0} は建築基礎構造設計指針⁵⁾ (以下、基礎指針) により式 (1) から算定した。 ξ は群杭係数であり、本検討においては $\xi \approx 0.88$ である。地盤の変形係数 E_0 は $E_0 = 2(1 + \nu)G_0/30$ とした。せん断弾性係数 G_0 は、 $G_0 = \gamma V_s^2/9.8$ の関係式を用いて算出した。 ν はポアソン比で、0.30 とした。骨格曲線は図 3 に示すように、第一折れ点が 0.001m、第二折れ点が 0.010m のトリリニアばねとした。事前に実施した予備増分解析の結果、杭と地盤の最大相対変位は約 0.008m であった。第二折れ点以降は、安全を見てその 2 倍である 0.016m の点を通る直線とした。

$$k_{h0} = 80 \times \xi \times E_0 \times \left(\frac{B}{B_0}\right)^{\frac{3}{4}} \quad (1)$$

B : 杭径[m]
 B_0 : 基準杭径 (0.01) [m]

3.3 ラフト底面摩擦ばね

図 4 にラフト底面摩擦ばねを示す。最大摩擦力 Q_{FRIC} は式(2)から算定し 650,000kN とした。ラフトの鉛直荷重分担率 α_r は 0.65、ラフト底面と地盤との摩擦係数 μ は 0.50 と仮定した。また、摩擦ばねの剛性はラフトの負担する水平荷重と後述するコーンモデル法⁴⁾の地表面変位の比として算定した。

$$Q_{FRIC} = \mu(\alpha_r \times \Sigma W) \quad (2)$$

3.4 土圧合力ばね

解析モデルに設定した土圧合力ばねを図 5 に示す。土圧合力ばねは基礎指針の 4.3 節により地盤と基礎の相対変位と、基礎根入れ部の土圧合力の関係を求めた。解析モデルにおける土圧合力ばねの骨格曲線は、相対変位が 0~0.1m の範囲において基礎指針の骨格曲線と概ね一致するように係数を調整した R-O モデルとした。

3.5 地震動による地盤変形

図 6 に地震動による地盤変形を示す。地震荷重レベルにより決まる定数を 1.0 とし基礎指針の 4.5 節により算定した。本報の検討はパラメータスタディのため、杭頭から杭先端に作用させる地盤変形は、杭頭位置を地表面と仮定して算定した同一のものを全ケースで用い、土圧合力ばねには杭頭位置と杭頭-0.5m 位置から外挿した地盤変形を作用させた。杭頭位置の地盤変形は 23.1mm であった。

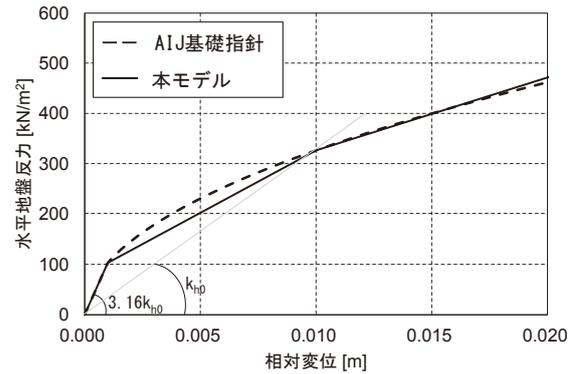


図 3 地盤ばねの骨格曲線

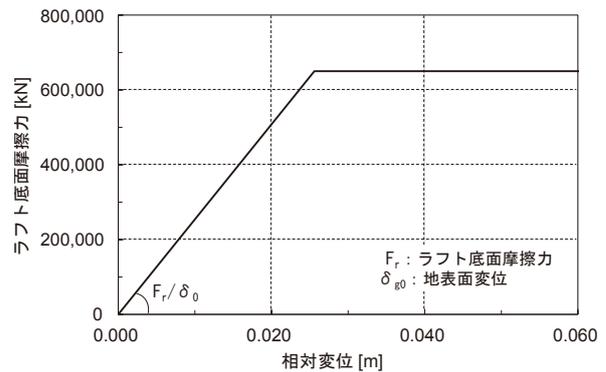


図 4 ラフト底面摩擦ばね

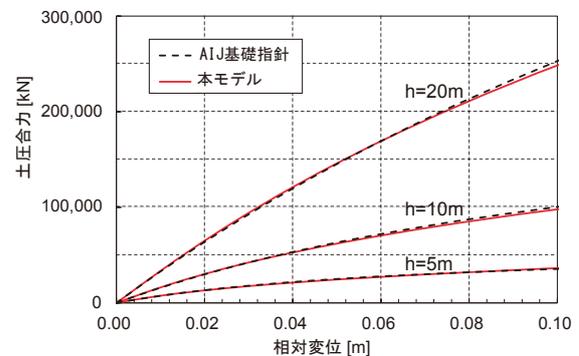


図 5 土圧合力ばね

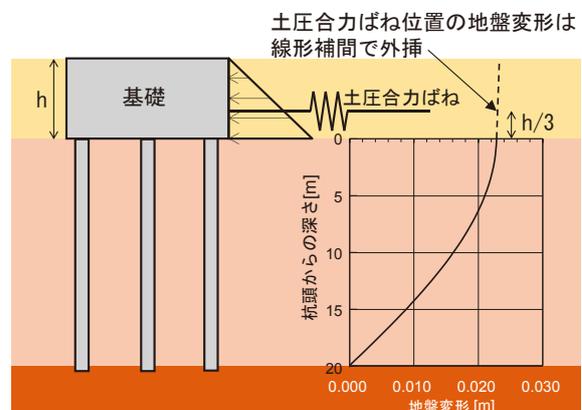


図 6 地震動による地盤変形

3.6 ラフト底面摩擦による地盤変形

ラフト底面摩擦による地盤変形は、弾性時($G/G_0=1.0$)の地盤剛性を用いてコンモデル法により算定した。図 7 に示すように、杭先端深さの地盤変形を 0mm としたとき最大摩擦力 Q_{FRIC} 時のラフト底の地盤変形は 13.9mm であった。解析モデルに入力する際には、ラフト底面摩擦ばねが負担する荷重の大きさと対応するような地盤変形の大きさになるように、増分解析を繰り返しながら地盤変形の大きさを調整した。

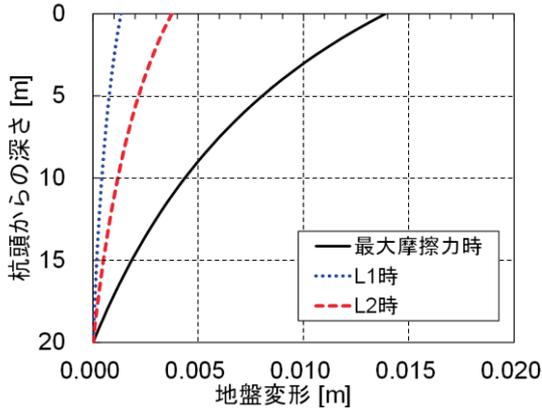


図 7 ラフト底面摩擦による地盤変形

§4. 解析結果と考察

4.1 荷重変形関係

図 8 にラフト水平変位-水平荷重についての荷重変位関係を示す。水平荷重合計が 100,000kN の時点が L1 荷重時、250,000kN の時点が L2 荷重時である。ケース毎のラフト水平変位の最大値に大きな差は見られない。土圧合力ばねは線形的な挙動をしており、根入れが深くなるほど土圧合力ばねの負担が大きくなる傾向を示している。ラフト水平変位 0.01m 程度から杭の水平地盤ばねの非線形化が始まっている。また、ラフトの滑動は認められない。

4.2 水平荷重分担率

図 9 にラフト水平変位-水平荷重分担率関係図を示す。いずれの解析結果も荷重負担割合はラフト変位約 0.01m 以降に変化している。また、表 1 に各要素の水平荷重分担率を、解析ケース毎に示す。土圧合力と根入れ深さに着目すると、L1 荷重時、L2 荷重時ともに土圧合力ばねの負担荷重は深さに応じて線形的に増加しており、土圧合力ばねはほとんど非線形化していないことがわかる。L2 荷重時の $h=0m$ と $h=20m$ の水平荷重分担率を比較するとラフトは 11.1%減、杭は 2.1%減と

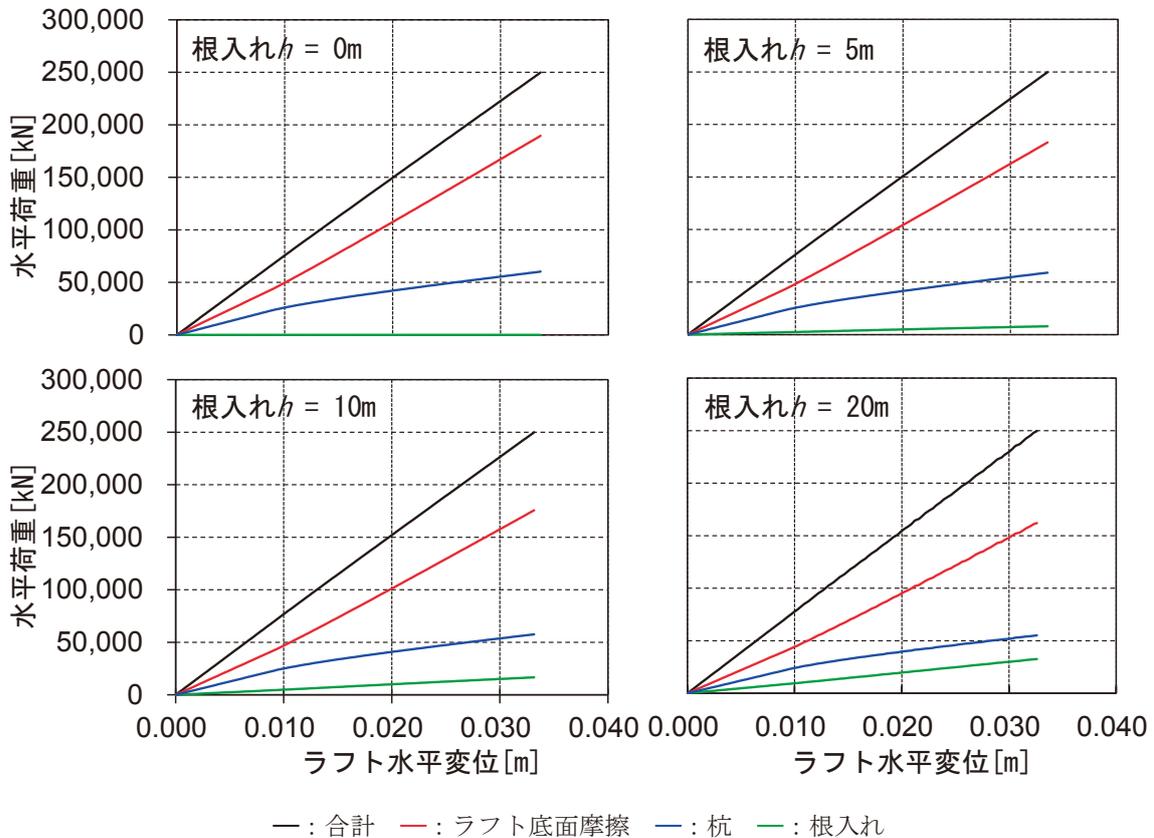


図 8 ラフト水平変位-水平荷重関係

なっており、減少分の合計となる 13.2%を土圧合力ばねが負担している。L1 荷重時に比べて L2 荷重時に杭の荷重分担率が減少しているのは、水平地盤ばねの非線形化の影響である。

4.3 根入れ深さによる杭頭応力の比較

図 10 に $h = 0\text{m}$ 、 $h = 20\text{m}$ における建物中央部にある杭の L1 荷重時、L2 荷重時の曲げモーメント図、せん断力図を示す。なお、本解析では杭は弾性梁要素であり、すべての杭で杭の水平地盤ばねを同一としているため杭ごとの応力に差は生じない。L1 荷重時の杭頭曲

げモーメントは $h = 0\text{m}$ で 1,908kNm、 $h = 20\text{m}$ で 1,738kNm であった。L2 荷重時では、 $h = 0\text{m}$ は 4,145kNm、 $h = 20\text{m}$ は 3,796kNm となっている。表 2 に杭頭応力の絶対値を根入れ深さ毎に示す。L2 荷重時の杭頭モーメントに着目すると、 $h = 0\text{m}$ と比較して、 $h = 5\text{m}$ は 2.0%、 $h = 10\text{m}$ は 4.3%、 $h = 20\text{m}$ は 8.4%減少している。L1 荷重時、L2 荷重時の杭頭モーメントを比較すると、根入れ深さに応じた応力減少の割合が異なっている。これは 4.2 節に述べたように、水平地盤ばねの非線形化によるものである。せん断力についても同様の傾向を示している。

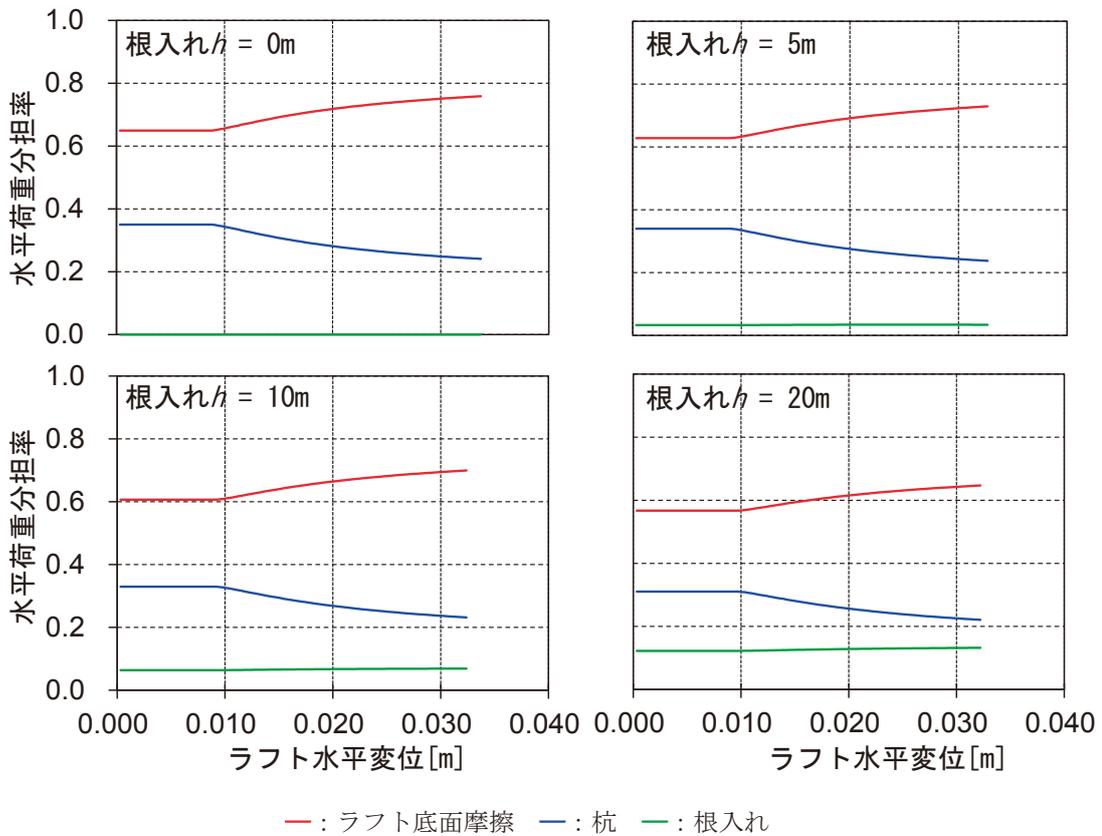


図9 ラフト水平変位-水平荷重分担率

表1 水平荷重分担率

根入れ[m]	ラフト底面摩擦		杭		根入れ	
	L1 荷重時	L2 荷重時	L1 荷重時	L2 荷重時	L1 荷重時	L2 荷重時
$h = 0$	68.1%	75.8%	31.9%	24.2%	0.0%	0.0%
$h = 5$	65.5%	73.0%	31.2%	23.7%	3.3%	3.3%
$h = 10$	62.9%	70.0%	30.6%	23.1%	6.5%	6.9%
$h = 20$	58.6%	64.7%	29.0%	22.1%	12.4%	13.2%

表 2 杭頭応力

根入れ[m]	杭頭モーメント M[kNm]		$h=0m$ に対する 杭頭 M の割合[%]		杭頭せん断力 Q[kN]		$h=0m$ に対する 杭頭 Q の割合[%]	
	L1 荷重時	L2 荷重時	L1 荷重時	L2 荷重時	L1 荷重時	L2 荷重時	L1 荷重時	L2 荷重時
$h=0$	1,908	4,145	100.0%	100.0%	905	1,685	100.0%	100.0%
$h=5$	1,864	4,062	97.7%	98.0%	886	1,651	97.9%	98.0%
$h=10$	1,820	3,968	95.4%	95.7%	867	1,612	95.9%	95.7%
$h=20$	1,738	3,796	91.1%	91.6%	832	1,541	91.9%	91.5%

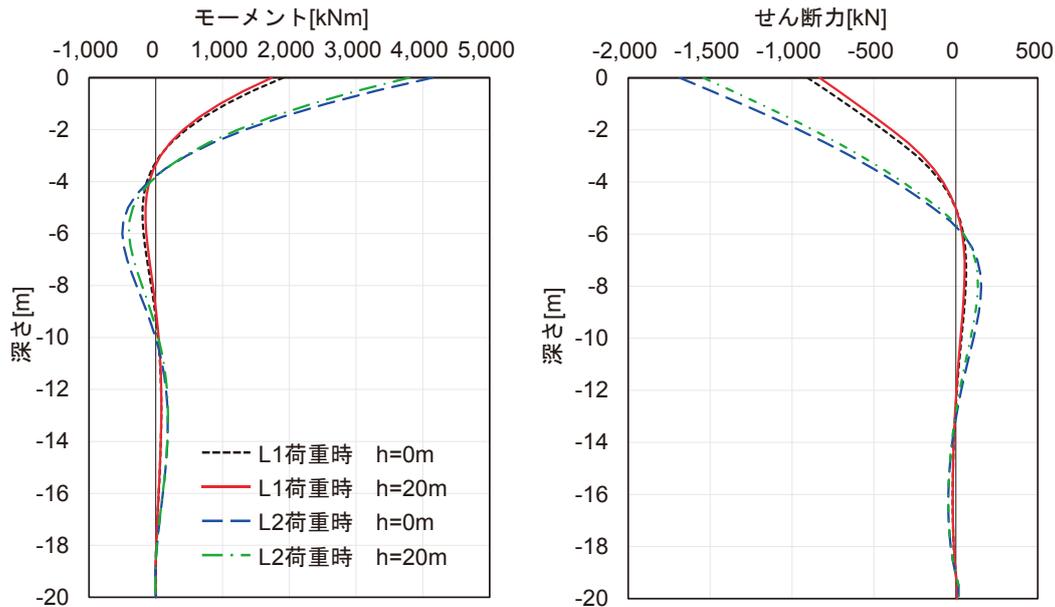


図 10 CASE1 と CASE4 の杭応力図

§5. まとめ

パイルド・ラフト基礎の建物に作用する各水平力抵抗要素の荷重分担率を把握することを目的として、立体フレーム解析の増分解析を実施した。本報のまとめを以下に示す。

- 建築基礎構造設計指針に従い建物根入れ部を考慮すると、本解析においては、土圧合力ばねが全体の水平荷重のうち最大で約 13%負担していた。
- 土圧合力ばねを用いて基礎の根入れを評価すると、根入れ深さに比例して杭頭応力が低減された。
- 根入れを考慮しない場合と根入れ深さを 20m とした場合を比較すると、杭が負担する水平力の分担率は L1 荷重時で 2.9%、L2 荷重時で 2.1%低減され、杭頭モーメントは L1 荷重時で 8.9%、L2 荷重時で 8.4%低減された。

謝辞

本検討にあたり、室蘭工業大学 大学院工学研究科 准教授 永井 宏 先生には貴重なご意見とご指導を賜りました。ここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 平川恭章,濱田純次,山下清:あべのハルカスの基礎構造設計と施工;基礎工 Vol.42 No.11;pp.29-36,2014.11
- 2) 土橋 徹,人見泰義,藤井彰人,山中昌之,佐原守,渡辺哲巳,鈴木直子,徳山純一郎,富澤健:超高層建物を支持する固結砂層上のパイルド・ラフト基礎(その 1~3);日本建築学会大会学術講演梗概集;pp.491-496,2014.9
- 3) 土佐内優介,岸俊甫,佐々木仁,永井宏:地下階の根入れ抵抗を考慮したパイルド・ラフト基礎の水平荷重分担率に関する解析的検討 (その 1~2) 建物条件と解析概要;日本建築学会大会学術講演梗概集;pp.545-546,2021.9
- 4) SNAP;株式会社構造システム
- 5) 日本建築学会:建築基礎構造設計指針,2019.11

ひとこと

パイルド・ラフト基礎は建設材料の削減により低炭素社会の実現に寄与できる技術です。検討をさらに進めることで今後の設計や施工に活用していきたいと思います。



岸 俊甫